

На правах рукописи

НАУМОВ Анатолий Алексеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ФЛУКТУАЦИОННОЙ  
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАДИОМЕТРОВ  
ОПТИМИЗАЦИЕЙ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПЕРЕХОДОВ  
ДЖОЗЕФСОНА И СПОСОБОВ ПРИЕМА СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Специальность 05.12.01 – "Теоретические основы радиотехники"*

АВТОРЕФЕРАТ

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК



КАЗАНЬ – 2000

Работа выполнена в Казанском государственном энергетическом институте

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор Бордонский Г.С. (г. Чита)

**НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА**

**КФУ**



**0000947820**

доктор физико-математических наук,  
Троицкий А.В. (г. Нижний Новгород)

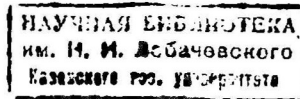
доктор технических наук,  
профессор Урецкий Я.С. (г.Казань)

Ведущая организация:

Казанский Физико-технический институт  
Казанского научного центра РАН

Защита диссертации состоится " 27 " апреля 2000 г. в 210 ауд.  
физического факультета Казанского государственного университета на  
заседании Диссертационного Совета Д 053.29.05 по адресу: 420008,  
г. Казань, ул. Кремлевская, 18, КГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И.  
Лобачевского Казанского государственного университета.



Автореферат разослан

" \_\_\_\_ " марта 2000 г.

Ученый секретарь  
Специализированного Совета  
канд. техн. наук

Бухмин В.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям особенностей приема слабых шумовых сигналов широкополосными джозефсоновскими радиометрами, разработке и созданию высокочувствительных криогенных приемников миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн и проведению радиометрических наблюдений природных и антропогенных объектов.

**Актуальность проблемы**

Совершенствование методов объективной оценки состояния окружающей среды, на которую все большее влияние оказывает деятельность человека, контроль состояния созданных им объектов является одной из важнейших задач современной науки. Ее успешное решение в значительной мере зависит от совершенствования методов исследования и применяемой аппаратуры. Поэтому теоретические и экспериментальные исследования, ставящие своей целью изучение физических основ функционирования высокочувствительной приемной аппаратуры, предназначенной для обнаружения слабых шумовых сигналов, являются одной из наиболее актуальных задач радиофизики и радиотехники.

Среди методов глобального мониторинга окружающей среды значительное место занимают те, в которых используется собственное и рассеянное излучение объектов естественного и антропогенного происхождения. При этом, наряду с контактными и активными дистанционными методами исследований, большой интерес представляет определение физико-механических характеристик этих объектов пассивными методами, не воздействующими на изучаемый объект, обеспечивающими абсолютную скрытность наблюдений и свободными от экологических проблем применения зондирующего радиоизлучения [А1].

Пассивное зондирование основано на известном факте: любое тело с температурой, отличной от абсолютного нуля, является источником электромагнитного излучения, имеющего шумовой характер. Измерив его характеристики, можно дистанционно определить свойства различных объектов, в том числе геофизических и энергетических. При этом информацию о параметрах исследуемых объектов несет не только температура излучения, но и его спектр, направленные свойства и другие характеристики.

К наиболее сложным и, вместе с тем, привлекательным объектам для изучения методами пассивной радиометрии можно отнести водную поверхность и низкотемпературную плазму. При этом особенно интересными являются диапазоны мм и субмм длин волн, т. к. в этих диапазонах имеются окна прозрачности атмосферы и не имеется, в отличие от видимого и инфракрасного диапазонов, сильной зависимости от компонент атмосферы: облаков, дождя, снега, тумана [1].

Трудности, связанные с определением состояния поверхности Мирового Океана, вызваны его огромной площадью, а также дороговизной и сложностью применения контактных методов наблюдения. Сбор информации путем дистанционного зондирования, в том числе и с помощью летательных аппаратов, представляется значительно более привлекательным. Изучение механизмов теплового излучения возмущенной водной поверхности является важной задачей дистанционной океанографии. При этом приобретает особую значимость вопрос об интерпретации экспериментальных данных, которая упрощается при использовании результатов модельных исследований в хорошо контролируемых условиях, полученных с помощью комплексных дистанционных и контактных измерений.

Актуальной является задача измерения параметров низкотемпературной плазмы (например, факела горения реактивного двигателя) по ее собственному излучению в микроволновом диапазоне длин волн. Наряду со слабым влиянием компонент атмосферы в этом диапазоне, что особенно важно, когда расстояние от объекта излучения до приемной аппаратуры является большим, в данном диапазоне находится плазменная частота низкотемпературной плазмы.

Информативность данных, получаемых при дистанционном зондировании, существенным образом зависит от чувствительности используемых для этой цели приемных устройств. Чем большую чувствительность имеет аппаратура, тем с большей точностью могут быть проведены измерения, и тем более тонкие эффекты могут быть зафиксированы. Это стимулирует проведение исследований по созданию все более совершенной аппаратуры.

Долгое время в радиометрии, как правило, использовались приемники, работающие при комнатной температуре ( $\sim 300$  K), и лишь эпизодически осуществлялось их охлаждение до температуры жидкого азота (77 K). Коренной перелом произошел с момента открытия в 1962 г. английским физиком Брайаном Джозефсоном эффектов, носящих его имя [2]. Им было показано, что системе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник при определенных условиях, определяемых толщиной прослойки изолятора, длиной когерентности сверхпроводника и т.п., может существовать сверхпроводящая компонента тока, протекающая через изолирующую прослойку. В результате был создан джозефсоновский переход - нелинейный элемент, обладающий с радиофизической точки зрения уникальными параметрами: очень высокой степенью нелинейности вольтамперной характеристики (ВАХ) и крайне низкими шумами.

Первые джозефсоновские радиометры создавались на основе сверхпроводящих точечных контактов (СТК), долгое время обладавших наилучшей совокупностью параметров для СВЧ применений. Использование СТК позволило достичь наивысших значений флуктуационной чувствительности  $\delta T$  радиометров в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн [3]. Имелись сообщения об эпизодическом применении джозефсоновских ра-



диометров на СТК в радиоастрономии [4, 5] и попытках исследования геофизических объектов [6].

Как показал опыт эксплуатации СТК, наряду с достоинствами они обладают и существенными недостатками - малой механической прочностью и недостаточной воспроизводимостью параметров, что создает значительные трудности при их использовании. Поэтому столь важными представлялись работы по созданию высокочувствительных приемных устройств, использующих интегральные криогенные элементы, свободные от недостатков, присущих СТК.

Успехи криогенной СВЧ микроэлектроники позволили создать на основе новых сверхпроводниковых элементов - торцевых джозефсоновских переходов (ТДП) приемные устройства миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, обладающие целым рядом достоинств [7]. При этом хорошо изученные радиофизические принципы функционирования СТК джозефсоновских переходов в схеме широкополосного радиометра не могут быть автоматически перенесены на джозефсоновские структуры других типов. В связи с особенностями геометрии ТДП и наличием подложки потребовалось проведение комплекса исследований их шумовых и сигнальных свойств, согласования переходов с СВЧ трактом, оптимизации режимов работы и т.д. Стабильность современных торцевых джозефсоновских переходов и программируемость их параметров при изготовлении позволяют создавать последовательные цепочки из этих элементов (ЦТДП) [8]. Применение ЦТДП в ряде случаев предпочтительнее, чем одиночных ТДП; в приемных устройствах можно реализовать значительно больший динамический диапазон, их легче согласовать с сигнальным трактом, они лучше защищены от электрошоков и т.д.

Приемники на джозефсоновских элементах традиционно создавались, как правило, по модуляционной схеме, в которой джозефсоновские переходы использовались как классические нелинейные элементы. При этом не использовались их специфические особенности, в частности, динамические свойства их вольтамперных характеристик, наличие собственной генерации и т.п. Использование этих особенностей для поиска более рациональных схем построения приемных устройств, позволяющих улучшить шумовые свойства приемника и увеличить за счет этого его чувствительность, представляются весьма привлекательной задачей.

Объем информации, полученной с помощью дистанционного зондирования, заметно повышается при применении многоканальной аппаратуры. Тем не менее, сообщения о попытках создания многоканальных приемных устройств на криогенных высокочувствительных джозефсоновских элементах очень редки. Чаще встречаются публикации, касающиеся отдельных элементов многоэлементных устройств. Тем более это касается упоминавшихся выше радиометров, использующих специфические свойства ВАХ джозефсо-

новских переходов. Создание таких устройств и изучение особенностей их работы важно как в теоретическом, так и в практическом отношениях.

Расширение теоретических знаний в области физики сверхпроводниковых слабосвязанных элементов, а также достижения технологии, приведшие к получению стабильных джозефсоновских переходов с заданными характеристиками, позволяет приступить к разработке многоканальных джозефсоновских приемных устройств. При этом требует своего решения значительное число радиофизических задач: выбор оптимальной схемы построения многоканального радиометра, определение условий наиболее эффективного взаимодействия электромагнитного излучения с многоэлементной матрицей, решение проблемы электромагнитной совместимости нескольких джозефсоновских переходов в матрице, поиск оптимальных источников сигналов калибровки, подшумливания и т.д.

В связи с открытием в 1986 году К. Мюллером и Дж. Беднорцем высокотемпературных сверхпроводников [9] возник естественный интерес к созданию на их основе джозефсоновских переходов (ВТСП ДП). Этот интерес подогревается не только эксплуатационными и материальными выгодами при переходе от гелиевого (4,2 К) к азотному (77 К) диапазону температур, но и наличием у ВТСП большего, чем у низкотемпературных сверхпроводников, значения ширины энергетической щели. Последнее способствует значительному расширению частотного диапазона, в котором могут эффективно использоваться ВТСП джозефсоновские приемные устройства. Однако, создание реальных приборов на основе ВТСП сопряжено с необходимостью решения ряда сложных научно-технических задач, как технологических (создание структур с воспроизводимыми параметрами), так и радиофизических (определение механизмов отклика на СВЧ-излучение, особенности взаимодействия переходов с электродинамической системой и т.д.).

Целью работы явилось проведение цикла фундаментальных и прикладных научных исследований, направленных на изучение особенностей прisma электромагнитного излучения джозефсоновскими переходами различных типов, изготовленными по различной технологии, из различных материалов, создание на их основе широкополосных джозефсоновских радиометров, включающих одноканальные и многоканальные приемники миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, построенных как по традиционным, так и по оригинальным схемам, изучение радиофизических характеристик этих устройств и проведение с их помощью радиометрических исследований собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности и низкотемпературной плазмы.

Решение задач, связанных с достижением поставленных целей, можно условно разбить на три группы:

- исследование радиофизических свойств джозефсоновских переходов, как автономных, так и включенных во внешнюю электродина-

мическую систему, изготовленных из различных материалов по различным технологиям;

- создание одноканальных и многоканальных джозефсоновских радиометров микроволнового диапазона, исследование особенностей их работы, измерение и анализ их радиофизических характеристик;
- применение высокочувствительных джозефсоновских радиометров для исследований собственного радиотеплового излучения природных и антропогенных объектов, в частности, взволнованной водной поверхности и низкотемпературной плазмы факела горения твердотопливного реактивного двигателя.

Работа выполнялись в период 1979 - 1999 г.г. и включала теоретические и экспериментальные исследования, технологические разработки, создание специальных методик, исследовательских установок, стендов, лабораторных макетов и образцов приемных устройств для проведения натурных наблюдений, а также выполнение серии экспериментальных исследований в условиях лаборатории и полигона.

### Научная новизна

1. Проведен анализ шумов детекторного радиометра на переходах Джозефсона. На основе изучения шумовых свойств джозефсоновского контакта, находящегося под воздействием интенсивного СВЧ-сигнала предложена оригинальная схема и обоснована возможность создания джозефсоновского радиометра с управляющим сигналом (УС-радиометр). Показано, что в качестве УС могут быть использовано как шумовое, так и монохроматическое СВЧ излучение. Предложены методики расчета флуктуационных чувствительностей радиометров с монохроматическим и шумовым УС. Теоретически и экспериментально показано, что флуктуационная чувствительность УС-радиометров может иметь более высокие значения, чем у модуляционного радиометра на том же самом джозефсоновском переходе (ДП). Доказано, что эффект повышения чувствительности является следствием подавления собственной генерации перехода в присутствии УС, а также расширения полосы приема и уменьшения потерь входного сигнала за счет устранения модулятора из входного тракта.

2. Изучены зависимости величин шумовой температуры собственного излучения ТДП в зависимости от тока смещения. Установлена возможность использования джозефсоновских переходов не только в качестве детекторов, но и генераторов УС, а также источников сигналов калибровки и подшумливания. Определена оптимальная для использования в УС-радиометре величина электромагнитного взаимодействия генераторных и детекторных ТДП, находящихся в единой электродинамической системе.

3. Разработана, реализована и исследована модель многоканального джозефсоновского УС-радиометра, содержащего матрицу детекторных ТДП, генераторы УС, сигналов калибровки и подшумливания на ТДП. Принципы создания многоканального матричного радиометра позволили обеспечить

высокие радиофизические характеристики, чрезвычайно низкое энергопотребление, удобное сервисное обслуживание и высокую надежность.

4. Изучено влияние СВЧ-излучения на ВАХ ЦТДП. Показано, что образование областей отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) на ВАХ ЦТДП связано с влиянием значительной емкости переходов. Высказана рекомендация использования в качестве детекторов ЦТДП с параметром Маккамбера-Стьюарта  $< 0,2$ , у которых участки ОДС отсутствуют. Отмечено, что при напряжениях близких к нулю, ВАХ ЦТДП не имеющие гистерезиса, имеют увеличенный флуктуационный загиб, связанный с разбросом параметров отдельных звеньев цепочки.

5. Исследованы высокотемпературные джозефсоновские переходы  $\text{YBaCuO}$  на бикристаллической подложке. Обнаружено наличие двух составляющих отклика на СВЧ воздействие: джозефсоновской, преобладающей при малых напряжениях смещения, и составляющей, доминирующей при больших напряжениях. Наличие компоненты, не связанной с джозефсоновским типом проводимости, объяснены с использованием модели квазичастичной прыжковой проводимости.

6. Исследованы электрофизические характеристики цепочек ВТСП ДП на бикристаллической подложке, а также их взаимодействие с излучением мм диапазона волн. Показано, что вольтваттная чувствительность детекторов на основе цепочек ДП существенно выше, чем у детектора на единичном переходе, и у них возможна частичная синхронизация переходов.

7. Впервые с помощью джозефсоновского радиометра с  $\delta T \sim 0,01$  К проведены систематические измерения собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности и влияния на него гравитационно-капиллярных, капиллярных волн и течения. Проведен численный расчет радиояркостной температуры собственного излучения воды, поверхность которой моделируется монохроматической гравитационно-капиллярной волной. Результаты расчета согласуются с экспериментально полученными данными при крутизне волн  $< 0,5$ .

8. Проведены исследования радиоизлучения факела горения на модели твердотопливного реактивного двигателя на частотах  $3,5 \div 37,5$  ГГц. Характеристики излучения рассчитаны на математической модели в виде плоского слоя. Показано соответствие расчетных и экспериментальных данных при исследовании спектральных и направленных свойств излучения плазменного образования.

### **Практическая значимость**

1. Впервые реализован и экспериментально исследован 4-х канальный модуляционный джозефсоновский радиометр на управляемых СТК с  $\delta T$  по каждому из каналов  $\sim 0,01$  К, при  $\tau = 1$  с. Показано, что многоканальный радиометр на СТК Джозефсона способен работать в условиях реального геофизического эксперимента.

2. Проведено исследование влияния материалов, из которых изготовлен СТК на вольтваттную чувствительность детекторов. Показано, что наиболее предпочтительным материалом для создания СТК является монокристаллический ниобий.

3. Впервые разработан и создан макет джозефсоновского УС-радиометра, чувствительность которого в три раза выше, чем у модуляционного радиометра на том же самом СТК. Схема радиометра защищена авторским свидетельством. Проведен анализ и выполнены экспериментальные исследования флуктуаций коэффициента передачи джозефсоновского детектора на СТК.

4. Измерены величины шумовой температуры собственной генерации ТДП в зависимости от режима работы по постоянному току, при этом подтверждена возможность использования ТДП в качестве генератора УС, а также источников сигналов калибровки и подшумливания.

5. Определены условия достижения максимальных чувствительностей джозефсоновских УС-радиометров на СТК и ТДП, при использовании в качестве УС внешних шумовых, монохроматических сигналов, а также собственного излучения генераторного ТДП.

6. Создана модель и экспериментально исследованы радиофизические характеристики 8-ми канального радиометрического приемника на ТДП, что позволяет реализовать систему радиовидения на гелиевом уровне охлаждения.

7. Создан измерительный комплекс для полуавтоматической регистрации характеристик джозефсоновских переходов, позволяющий в едином цикле измерений определять совокупность их основных электро- и радиофизических параметров на азотном и гелиевом уровнях охлаждения. Показана возможность использования цепочек из ВТСП для детектирования мм и субмм излучения.

8. Разработана методика создания интегральных джозефсоновских элементов на серийном технологическом оборудовании, позволяющая изготавливать джозефсоновские элементы из мягких сверхпроводников с удовлетворительными характеристиками для радиофизических исследований, учебных и демонстрационных целей.

9. Показано, что с помощью высокочувствительных джозефсоновских радиометров на СТК возможно проведение длительных систематических исследований взволнованной водной поверхности и низкотемпературной плазмы в условиях полигона.

Достоверность результатов работы обеспечивается корректно обоснованными условиями проведения экспериментов, тщательностью выполнения исследований, основанных на современных методах измерений, применением высокоточной аппаратуры, анализом большого количества экспериментальных и теоретических данных, значительным временным отрезком проведения исследований. Она проявляется в совпадении результатов экспе-

риментов, полученных при использовании различных методик, в их повторяемости, в разумном согласии экспериментальных данных с теоретическими оценками, в корреляции с данными других авторов.

### **Апробация работы**

Основные материалы диссертационной работы докладывались на Всесоюзной радиоастрономической конференции "Радиоастрономическая аппаратура, антенны и методы" (Ереван - 1982), "Радиоастрономическая аппаратура" (Ереван - 1985), XIУ Всесоюзной конференции по распространению радиоволн (Ленинград - 1984), V Всесоюзном семинаре по техническим методам измерения океанографических параметров (г. Москва - 1983), XIX Всероссийской научной конференции "Распространение радиоволн" (Казань - 1999), II международной конференции "Проблемы и прикладные вопросы физики" (Саранск - 1999), Четвёртой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием "Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности" (С.-Петербург - 1999), научной конференции профессорско-преподавательского состава КФ МЭИ (г. Казань - 1995), научных семинарах Института Космических Исследований РАН (г. Москва), Физико-технического института Казанского филиала РАН, Московского педагогического государственного университета им. В.И. Ленина, ЦНИИ им. А.Н. Крылова (г. Санкт-Петербург), МГУ, КАИ, ИРЭ РАН, НПО "Сатурн" (г. Киев), МЭИ, Казанского государственного энергетического института, и ряде других организаций.

### **Публикации**

Основные положения диссертации опубликованы в 25 печатных работах, имеется авторское свидетельство на изобретение. Список работ приведен в автореферате. Ссылки на авторские публикации обозначены дополнительной буквой А перед порядковым номером.

### **Сруктура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, десяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 352 наименования. Полный объем диссертации составляет 427 страниц машинописного текста, в том числе 128 страниц рисунков и таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обсуждается актуальность проблемы, научная новизна и практическая ценность, сформулированы цели, дано краткое содержание диссертации, приведены основные результаты работы.

**В первой главе** приведен обзор литературных данных по теме диссертации и определены цели работы.

Рассматриваются характеристики собственного радиотеплового излучения водной поверхности. Отмечается, что основную роль в формировании излучения играет геометрическая шероховатость (волнение), которую условно разделяют на мелкомасштабную (капиллярные и гравитационно-

капиллярные волны) и крупномасштабную (гравитационные волны) составляющие. Рассмотрены результаты исследований водной поверхности с помощью СВЧ-радиометров, отмечается целесообразность проведения модельных исследований в специальных бассейнах.

При рассмотрении процессов формирования радиоизлучения плазмы показано, что метод пассивного СВЧ зондирования является весьма привлекательным при исследовании низкотемпературной плазмы, в том числе образующейся при работе реактивных двигателей. В литературе практически отсутствуют сведения о результатах исследований направленных свойств излучения факелов горения реактивных двигателей. Для диагностики параметров плазмы методом пассивного зондирования, наблюдения желательно проводить на нескольких частотах [10].

В данной главе проведен сравнительный анализ традиционных схем широкополосных радиометров СВЧ диапазона, указаны их достоинства и недостатки. Наиболее простой, но позволяющей получить высокую чувствительность является схема детекторного модуляционного радиометра. Недостатком модуляционных радиометров миллиметрового диапазона является наличие модулятора на входе устройства, сужающего входную полосу и вносящего дополнительные потери в тракт.

Проанализированы характеристики криогенных радиометров миллиметрового диапазона длин волн, показана перспективность использования в указанном диапазоне широкополосных джозефсоновских радиометров.

Проведен анализ принципов создания многоканальных радиометров, предназначенных для повышения достоверности получаемой информации и для построения радиоизображений в реальном масштабе времени, выделены особенности построения многоэлементных приемников. В настоящее время для построения радиоизображений используются преимущественно сканирующие системы, имеющие ряд существенных недостатков: большое время сканирования, сложные системы привода антенн, повышенное энергопотребление, габариты и вес. При использовании гетеродинных систем проблемой становится также подача сигнала гетеродина на каждый из нелинейных элементов, и проникновение излучения гетеродина через антенну на входы соседних каналов. В главе сделан вывод о том, что целесообразным вариантом матричного приемника является детекторный радиометр на основе джозефсоновских переходов.

В данной главе рассмотрены также элементы слабой сверхпроводимости и эффекта Джозефсона, особенности ВАХ джозефсоновских переходов, виды и способы создания джозефсоновских структур, принципы детектирования электромагнитного излучения джозефсоновскими переходами. Успешная работа джозефсоновского перехода в качестве СВЧ-детектора связана с увеличением его характеристического напряжения, уменьшением емкости и соответствием величины нормального сопротивления импедансу сигнального тракта. Наилучшими радиофизическими характеристиками для использо-



вания в качестве детекторов СВЧ диапазона обладают, как показывает анализ, сверхпроводящие точечные контакты и торцевые джозефсоновские переходы.

Хорошие перспективы для создания чувствительных элементов радиометров появились с открытием высокотемпературной сверхпроводимости. В связи с этим, в данной главе рассмотрены конструкции и принцип действия ВТСП ДП. Проанализированы особенности ВАХ весьма привлекательного для радиофизических применений джозефсоновского перехода на основе  $\text{YBaCuO}$  на бикристаллической подложке. Отмечено, что модель прыжковой проводимости Глазмана-Матвеева [11] хорошо описывает экспериментальные ВАХ и зависимости проводимости от напряжения на переходе, но применимость ее для описания СВЧ свойств ВТСП ДП на бикристаллической подложке требует дополнительного исследования.

Основные выводы, которые вытекают из содержания данной главы, следующие:

1. Изучение взволнованной водной поверхности, низкотемпературной плазмы и других природных и созданных человеком объектов методами пассивного дистанционного зондирования является актуальной задачей, особенно в СВЧ диапазоне волн.

2. Информативность данных, получаемых при дистанционном зондировании, возрастает с ростом чувствительности приемных устройств и при увеличении числа каналов.

3. Наивысшей флуктуационной чувствительностью в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн обладают широкополосные радиометры на переходах Джозефсона.

4. Имеются сообщения о создании радиометров на эффекте Джозефсона, однако сообщения о проведении с их помощью систематических исследований природных и антропогенных объектов (за исключением наблюдений в радиоастрономии, где условия проведения наблюдений близки к лабораторным) практически отсутствуют. Это объясняется тем, что джозефсоновские приемники долгое время создавались в основном как лабораторные макеты для исследований характеристик самого устройства, поэтому созданные радиометры не предназначены для использования в полевых условиях.

5. Во всех детекторных радиометрах на эффекте Джозефсона, переходы используются лишь как "классические" нелинейные элементы. Не имеется сведений об использовании специфических джозефсоновских свойств для повышения чувствительности радиометра, в частности, подавления собственной джозефсоновской генерации.

6. В настоящее время отсутствует массовое производство переходов Джозефсон в связи с тем, что для создания переходов Джозефсона с рекордными характеристиками требуется уникальное технологическое оборудование, имеющееся лишь в единичных научных центрах. Остается открытым



вопрос о возможности создания переходов Джозефсона для учебных и исследовательских целей на серийном оборудовании по доступной технологии.

7. Среди новых типов слабых связей выделяются туннельные структуры и торцевые джозефсоновские переходы. Появление торцевых джозефсоновских переходов, отличающихся высокой воспроизводимостью параметров, поставило целый ряд исследовательских задач, связанных в первую очередь с определением их шумовых характеристик и особенностей взаимодействия с СВЧ трактом радиометров.

8. Несмотря на большой объем результатов, полученных при исследовании торцевых джозефсоновских переходов, отсутствуют данные о возможности использования собственной джозефсоновской генерации ТДП для использования в системах радиометров.

9. В литературе практически отсутствуют сообщения о создании многоканальных детекторных криогенных радиометров, которые могли бы стать основой для создания матричных приемников.

10. С открытием высокотемпературных сверхпроводников активно ведутся работы по созданию на их основе джозефсоновских элементов с характеристиками, пригодными для решения прикладных задач. Вместе с тем, остается неясным ряд вопросов относящихся, в частности, к механизмам детектирования СВЧ-излучения высокотемпературными сверхпроводниковыми гонкоплечными джозефсоновскими переходами.

Основываясь на результатах обзора литературных данных, сформулированы цели работы:

1. Изучение влияния структуры материалов, применяемых для создания сверхпроводящих точечных контактов, на характеристики джозефсоновских детекторов СВЧ диапазона.

2. Создание радиометров СВЧ диапазона на СТК Джозефсона, предназначенных для проведения длительных радиометрических наблюдений природных и антропогенных объектов. Изучение радиофизических свойств радиометров и определение оптимальных характеристик используемых в них джозефсоновских детекторов.

3. Исследование свойств цепочек торцевых джозефсоновских переходов на основе низкотемпературных сверхпроводников, условий возникновения в них нестабильностей.

4. Исследования механизмов детектирования СВЧ излучения высокотемпературными сверхпроводниковыми тонкоплечными джозефсоновскими переходами. Определение условий, при которых преобладают различные механизмы детектирования. Изучение радиофизических характеристик тонкоплечных джозефсоновских переходов на основе высокотемпературных сверхпроводников изготовленных на бикристаллических подложках, а также характеристик последовательных цепочек на их основе.

5. Анализ и измерение шумовых характеристик джозефсоновских переходов, как в автономном варианте, так и при включении их в качестве чув-

ствительных элементов детекторных приемников СВЧ диапазона. Теоретическое и экспериментальное исследование возможности повышения флуктуационной чувствительности радиометров на джозефсоновских переходах за счет использования оригинальной схемы построения, уменьшающей вклад собственных шумов, вызванных собственной джозефсоновской генерацией, а также уменьшения потерь входного сигнала и увеличения полосы приема.

6. Создание лабораторных вариантов радиометров на СТК с шумовым и монохроматическим управляющими сигналами внешних генераторов. Измерение их радиофизических характеристик.

7. Исследование характеристик излучения торцевых джозефсоновских переходов для определения возможности их использования в качестве генераторов шума. Исследование взаимовлияния ТДП, находящихся в единой электродинамической системе.

8. Создание и исследование криогенных радиометрических датчиков с использованием ТДП в качестве широкополосных детекторов, генераторов управляющего сигнала, генераторов подшумливания и калибровки. Определение характеристик и оптимальных режимов работы радиометров с управляющим сигналом на основе многоэлементных радиометрических датчиков.

9. Разработка и создание многоканального детекторного радиометра с управляющим сигналом субмиллиметрового диапазона длин волн на основе ТДП-матрицы и исследование его характеристик.

10. Проведение с помощью широкополосных джозефсоновских радиометров радиометрических наблюдений взволнованной водной поверхности в хорошо контролируемых условиях.

11. Проведение радиометрических наблюдений направленных и спектральных характеристик излучения факела горения на модели твердотопливного реактивного двигателя.

12. Разработка ряда методик проведения измерений и создание современных измерительных установок.

**Вторая глава** посвящена описанию особенностей различных сверхпроводниковых переходов Джозефсона, предназначенных для использования в качестве детекторов излучения СВЧ диапазона.

Обосновывается выбор СТК Джозефсона из ниобия (Nb), дистанционно настраиваемого в жидком гелии, что особенно важно для многоканальных радиометров. Приведены результаты исследования влияния материала на радиофизические свойства контакта. При сравнении параметров СТК, изготовленных из Nb различных типов (монокристаллического, поликристаллического, отожженного в вакууме и неотожженного), показано, что наиболее высокие значения характеристического напряжения и вольт-ваттной чувствительности наблюдаются у СТК из монокристаллического Nb, что объяснено влиянием формы микрозакоротов, которые обеспечивают слабую связь в СТК [A2]. Результаты исследования поверхности сверхпроводников с помо-

щью растровой электронной микроскопии подтвердили высказанное предположение.

Желание иметь для научных исследований уникальные нелинейные элементы Джозефсона вынуждало исследователей в течение длительного периода использовать СТК. Несмотря на то, что в этом направлении достигнуты очевидные успехи, приходится констатировать, что с помощью СТК невозможно добиться высокой воспроизводимости и предсказуемости параметров радиометров. Причина тому - сама природа точечных контактов - случайное образование микрозакороток. Кроме того, не удается полностью устранить влияние механических воздействий на контакт - ударов и вибраций. Определенные неудобства создаются из-за воздействия на микрозакоротки значительных экстр-токов при переходных режимах, коммутациях, статических разрядах.

Все это стимулировало проведение поиска технологии создания альтернативных джозефсоновских элементов. От недостатков СТК свободны сверхпроводящие переходы, изготовленные методами интегральной технологии. Однако, промышленного изготовления их до настоящего времени не проводится. Нами была разработана технология получения дешевых, достаточно просто изготавливаемых джозефсоновских структур на основе мягких сверхпроводников для лабораторной практики, в том числе для учебных и исследовательских целей. Это осуществлено без использования уникального оборудования, на серийных напылительных установках [А3]. Приводятся топологии, особенности технологии, электрофизические характеристики и ВАХ изготовленных структур. Нормальные сопротивления изготовленных переходов составили  $R_n = 0,35 \div 65$  Ом, критические токи  $I_c = 4,5 \div 35$  мкА, характерные напряжения  $V_c = 2 \div 2,3$  мВ. Большинство исследованных переходов показали высокую устойчивость к термоциклированию, восстанавливая свои характеристики при повторных охлаждениях до температуры жидкого гелия.

В главе приведены результаты исследования особенностей ТДП и последовательных цепочек ТДП, связанных с возникновением неустойчивостей, влияющих на характеристики устройств, в которых могут быть использованы данные джозефсоновские переходы. Проанализированы причины появления гистерезиса на ВАХ ТДП, сделан вывод о том, что основной причиной появления отрицательного дифференциального сопротивления является значительная емкость ТДП.

Обнаружено, что при напряжениях, близких к нулю, ВАХ ЦТДП не имеющих гистерезиса, имеет увеличенный более чем в 10 раз загиб связанный не только с флуктуациями тока, но и с разбросом параметров отдельных звеньев цепочки.

Результатам изучения свойств джозефсоновских структур, включенных во входные тракты детекторных модуляционных радиометров, посвящена третья глава.

В связи с тем, что радиометрический выигрыш непосредственно связан с входной полосой радиометра, были выполнены измерения этой характеристики для джозефсоновских модуляционных радиометров на СТК. Параметры СТК существенно меняются при больших мощностях падающего сигнала, поэтому определение полосы стандартным методом в этом случае непригодно, так как требует использования интенсивного зондирующего сигнала. Поэтому входная полоса определялась по зависимости вольтваттной чувствительности детектора от частоты. Ее экспериментальное значение составило 7 ГГц для 1,5 см и 8 мм диапазона длин волн, т.е. определяется полосой пропускания электронных модуляторов [A2].

Флуктуационная чувствительность во многом определяется шумами детектора. Проведенный анализ шумовых характеристик джозефсоновских переходов, как автономных, так и включенных во внешнюю электродинамическую систему, показал, что из основных составляющих шума автономного ДП: тепловых, дробовых шумов, фликкер-шумов и шумов, связанных с джозефсоновской генерацией, при малых напряжениях смещения наибольший вклад в общие шумы системы вносят и шумы, связанные с джозефсоновской генерацией. Опытным путем определена частота среза фликкер-шума, составившая  $\sim 1$  кГц.

Низкочастотные шумы ТДП, включенного в состав модуляционного детекторного радиометра, складываются из шумов, вносимых цепями задания тока смещения, съема сигнала и сигнального тракта. Показано, что первые две составляющие, при выполнении ряда условий, можно не учитывать вследствие их малости. Характеристики детектора на ДП с вольтваттной чувствительностью  $\eta > 10^5$  В/Вт определяются флуктуациями фонового излучения при наблюдении объектов земной поверхности ( $T_{\phi} = 300$  К). При  $\eta < 10^5$  В/Вт вклад флуктуаций фонового излучения в эффективную шумовую температуру приемника шумов мал при любых  $T_{\phi}$ , встречающихся на практике.

В связи с тем, что джозефсоновский переход может являться не только приемником, но и генератором электромагнитного излучения, немаловажен вопрос о взаимном влиянии переходов друг на друга, если они включены в общую электродинамическую систему. Такой анализ для двух ТДП выполнен с использованием эквивалентной схемы детекторной камеры. Показано, что степень взаимовлияния определяется режимами работы переходов по постоянному току, что, как показано ниже, с успехом использовано, в том числе и в многоканальных устройствах.

Изучены процессы, происходящие в высокотемпературных джозефсоновских  $YBaCuO$  переходах на бикристаллической подложке из фианита, с целью получения информации о физической природе токопереноса в них. С этой целью созданы квазиоптический макет и современная измерительная установка, позволяющая в одном цикле измерений регистрировать всю совокупность электрофизических параметров джозефсоновских переходов в диа-

пазоне частот  $125 \div 300$  ГГц, при температурах  $4,2 \div 77$  К [А4]. Наблюдаемый вид ВАХ ВТСП переходов объясняется переносом нормальной (квази-частичной) компоненты тока прыжковым механизмом проводимости через конечное число локализованных состояний в проводящем канале.

Исследованы результаты воздействия СВЧ излучения на ВТСП джозефсоновские переходы и цепочки таких переходов в широкой области изменений напряжения смещения ( $V < V_c$ ,  $V \geq V_c$ ). Показано, что при облучении одиночного перехода и ВТСП цепочки со стороны подложки, количество ступенек Шапиро, характеризующих взаимодействие перехода с излучением, существенно больше, чем при облучении со стороны структуры [А5]. По полученным откликам произведен расчет вольтваттной чувствительности детекторов  $\eta$ , использующих в качестве нелинейного элемента одиночные ВТСП переходы и их последовательные цепочки. Расчет показал, что значение чувствительности цепочек существенно выше чувствительности отдельного перехода ( $\eta \approx 1200$  В/Вт и  $360$  В/Вт, при  $T \approx 20$  К, соответственно), что объясняется лучшим согласованием цепочек с внешней электродинамической системой. При  $T \approx 60$  К  $\eta$  уменьшается в 1,5 - 2 раза.

Зависимость отклика ВТСП ДП от напряжения смещения имеет особенность, проявляющуюся в том, что, наряду с джозефсоновским откликом, наблюдающимся при малых напряжениях смещения, имеет место компонента отклика, преобладающая при больших напряжениях смещения ( $V \geq V_s = hf_s/2e$ ), не связанная с джозефсоновским механизмом проводимости. Качественно объяснить такую особенность отклика позволяет прыжковый механизм проводимости. Проведено наблюдение ВАХ цепочки ВТСП и отклика на электромагнитное излучение частотой  $530 - 560$  ГГц. В результате, показана перспективность использования ВТСП цепочек для создания радиометров коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн [А6].

**Четвертая глава** посвящена описанию детекторов 8 мм диапазона волн на СТК и 4-х канального модуляционного радиометра, созданного на их основе [А7]. Радиометр состоит из криогенной части и блока управления, находящегося при комнатной температуре. Криогенная часть включает в себя детекторную секцию, дистанционно настраиваемые СТК из ниобия, СВЧ-тракт и элементы НЧ-фильтров. Для обеспечения устойчивости работы радиометра приняты меры по стабилизации параметров СТК. Эти меры позволили довести эксплуатационные характеристики радиометра до уровня, при котором стала возможной его работа в условиях полигона на уровне чувствительности, не уступающем лабораторному.

Низкочастотная часть включает систему задания токов смещения через СТК, согласующие трансформаторы, систему усиления и регистрации, блоки питания электронных модуляторов и калибровочных генераторов, а также самопишущие потенциометры для регистрации выходных сигналов.

С помощью специального измерительного стенда проведены исследования характеристик радиометра, определены нормальные сопротивления переходов, оптимальные для достижения наивысших параметров приемника. Наилучшее значение флуктуационной чувствительности при постоянной интегрирования  $\tau = 1$  с составило  $\sim 0,01$  К по каждому из каналов, при  $R_n \sim 150$  Ом, температуре фона  $\sim 300$  К. Эти данные соответствуют лучшим значениям чувствительностей для данного частотного диапазона, известным из литературы. Заметного взаимовлияния каналов обнаружено не было.

**В пятой главе** приведены результаты теоретического анализа, позволившего предложить оригинальный принцип построения джозефсоновского радиометра [А8].

До настоящего времени чаще всего используемая схема радиометра, предполагает наличие модулятора на его входе. Последний сужает полосу прisma и обладает ненулевыми входными потерями. Используя особенности джозефсоновского перехода, в частности, возможность изменения его ВАХ под действием падающего электромагнитного излучения, а также наличие собственного излучения и способность менять его параметры при изменении приложенного напряжения, можно предложить схему радиометра с управляющим сигналом (УС-радиометр), не имеющего модулятора во входном тракте. Для ее реализации необходимо осуществлять модуляцию путем периодического воздействия на ВАХ джозефсоновского перехода, что можно реализовать путем подачи на контакт модулированного управляющего сигнала такой мощности, что под его действием джозефсоновская проводимость была бы в значительной мере подавлена. Подавая УС на переход в течение половины периода, можно добиться того, чтобы шумы нелинейного элемента, суммируемые за большое количество периодов модуляции, существенно уменьшились.

Исходя из указанных положений, по методу корреляционных функций, был проведен расчет флуктуационных чувствительностей УС-радиометров, использующих шумовые и монохроматические управляющие сигналы [А9, А10]. Из расчета следует, что  $\delta T$  радиометра зависит от изменения коэффициентов передачи квадратичного детектора при отсутствии управляющего сигнала ( $\beta_1$ ) и при его наличии ( $\beta_2$ ). Как показывает расчет, при использовании шумового управляющего сигнала выигрыш в чувствительности УС-радиометра по сравнению с модуляционным радиометром на том же самом джозефсоновском переходе составляет:

$$\frac{\delta T_{\text{мод}}}{\delta T_{\text{ус}}} = \frac{2(\beta_1 - \beta_2)}{\sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2 (T_{\text{ус}} / T_{\text{ш}})}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{ус}}$  и  $T_{\text{ш}}$  - шумовые температуры УС и детектора соответственно. При  $\beta_1 \gg \beta_2$  чувствительность УС-радиометра приближается к чувствительности компенсационной схемы.

Для обеспечения стабильной работы УС-радиометра в его схеме должна быть предусмотрена компенсация продетектированного сигнала на выходе детектора. Это позволяет избежать воздействия флуктуаций коэффициента усиления низкочастотной части радиометра. Проведенный анализ показал, что стабильность амплитуды компенсирующего сигнала должна быть не хуже  $10^{-5}$ .

Эффективность работы радиометра может зависеть от флуктуаций коэффициента передачи джозефсоновского детектора, на величину которого влияет целый ряд факторов, не все из которых поддаются учету. Оценки показывают, что изменение давления над поверхностью жидкого гелия, кипение жидкости и изменение термодинамической температуры контакта за счет попадающего на него внешнего сигнала не должны сказываться на чувствительности радиометра. В то же время, влияние механических вибраций, нестабильностей параметров сверхпроводящих контактов, суммарных воздействий всех факторов сложно оценить теоретически, поэтому сделан вывод о том, что их влияние на чувствительность радиометра следует определить из экспериментальных данных.

Шестая глава посвящена практической реализации УС-радиометра на СТК.

Вначале были проведены исследования влияния коэффициента передачи джозефсоновского детектора на чувствительность радиометра. Идея эксперимента состояла в том, что на вход детектора, включенного в состав модуляционного радиометра, попеременно с частотой модуляции подавались большие разностные сигналы от источника шумов и от эквивалента антенны. При значительных флуктуациях коэффициента передачи детектора именно они должны определять флуктуационную чувствительность радиометра. Проведенные эксперименты показали: 1) при используемых в радиометрах уровнях мощностей УС вкладом флуктуаций коэффициентов передачи детекторов можно пренебречь; 2) стабильность компенсирующих сигналов достаточна для использования в УС-радиометрах.

Результаты исследования радиометров с управляющим сигналом 8-мм диапазона длин волн, созданных на основе СТК Джозефсона, показали, что реализация радиометра возможна при использовании как шумового, так и монохроматического УС. При этом, в обоих случаях существуют оптимальные значения мощностей управляющего сигнала, при которых достигаются наивысшие значения флуктуационных чувствительностей радиометров. Минимальное значение  $\delta T$ , зарегистрированное для УС-радиометра с шумовым управляющим сигналом (рис. 1), составило  $\sim 0,004$  К при  $\tau = 1$  с. Таким образом достигнута флуктуационная чувствительность, примерно в три раза более высокая, чем у модуляционного радиометра на том же СТК [A11, A12]. Оптимальная мощность управляющего сигнала при этом составила  $\sim 1,5 \cdot 10^{-10}$  Вт. Полученный результат хорошо согласуется с расчетом, выполненным на основании выводов главы 5. При этом учитывается выигрыш в чувстви-



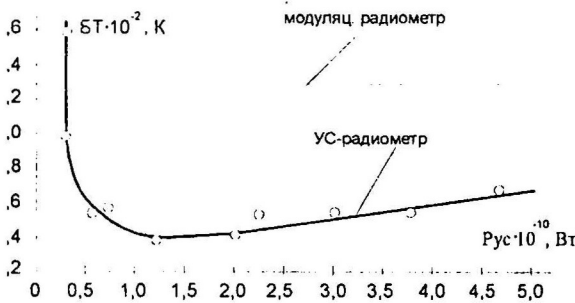


Рис. 1

тельности, полученный за счет использования схемы УС-радиометра, а также за счет расширения полосы приема и уменьшения прямых потерь во входном тракте при устранении из него модулятора.

Использование монохроматического УС, как показывают проведен-

ные эксперименты, также позволяет достичь выигрыша в чувствительности, который предсказан расчетом, приведенным в главе 5.

**7 глава** посвящена исследованиям, связанным с созданием УС-радиометров на ТДП [А13]. Более того, было предложено использовать ТДП не только в качестве детекторов, но в качестве источников радиоизлучения, используемых в схемах УС-радиометров.

В главе значительное внимание уделено разработке новых подходов к решению задачи совмещения каналов в многоканальных устройствах на ДП. Для этого были выработаны принципы создания современных многоканальных джозефсоновских приемных устройств, основные из которых: а) радиометр с УС; б) детектор на ТДП изготавливается в едином технологическом цикле с антенной; в) использование переходов Джозефсона в системах управления, калибровки и подшумливания.

Исследования проводились с помощью двух криогенных радиометрических датчиков (КРД): 1) на основе прямоугольного волновода 8 мм диапазона с двумя ТДП; 2) на основе круглого волновода с тремя ТДП.

Использование ТДП в качестве генераторов невозможно без определения характеристик излучения и определения оптимальных режимов их работы. Для этого пришлось использовать ряд оригинальных методик. Методика определения мощности поглощенной ДП основана на измерении величины подавления критического тока. Методика определения оптимальных режимов работы генераторного ТДП состояла в регистрации отклика детекторного перехода с одновременной записью тока через генераторный переход.

Были выполнены измерения собственной шумовой температуры ТДП ( $T_{\text{ш}}$ ) в 8 мм диапазоне волн по двум методам. Первый метод использует линейность зависимости  $\delta T$  от температуры фонового излучения. Сравнивая  $\delta T$  радиометра при различных температурах фона и измеряя  $\delta T$  при температуре собственного излучения, отраженного от идеальной закоротки на входе устройства, определялась шумовая температура последнего. При этом,  $T_{\text{ш}}$  составила 70 и 60 К.



Второй метод связан с использованием "теплого" супергетеродинного радиометра. Полученные результаты  $\sim 67$  и  $55$  К хорошо коррелируют с предыдущими результатами. Учет диссипативных потерь в сигнальном тракте радиометра приводит к значениям  $T_{ш} \sim 48$  К и  $28$  К. Данные результаты получены для напряжений смещения, соответствующих максимальной чувствительности детектора. Такие значения не являются оптимальными для получения больших значений  $T_{ш}$ . Измеренные значения  $T_{ш}$  малы, и вопрос о возможности использования ТДП для создания системы подшумливания потребовал дополнительного изучения.

Для этого проведены эксперименты по исследованию взаимодействия ТДП. Это воздействие сопоставлялось с аналогичным эффектом, вызванным излучением внешнего калиброванного ГШ. Результаты экспериментов показали, что  $T_{ш}$  линейно растет с увеличением напряжения на переходе. Максимальное зарегистрированное значение  $T_{ш}$  составило  $\sim 450$  К, что достаточно для компенсации шумовой температуры большинства геофизических объектов.

Отметим, что измеренные значения  $T_{ш}$  оказались в 5–10 раз меньше, чем расчетные. Различие связано с рассогласованием ДП с сигнальным трактом. Согласование может быть существенно улучшено при применении высокоомных ДП. Кроме того, для калибровки обычно используют источники белого шума, ДП таковыми не являются. Однако, ТДП с сопротивлениями  $\sim 100 \div 150$  Ом имеют полосу генерации  $15 \div 25$  ГГц, что соответствует полосам детекторных радиометров мм диапазона волн. Таким образом, высокоомные ТДП предпочтительны для использования в качестве ГШ, как из-за упрощения согласования с сигнальным трактом, так и из-за характеристик шумового излучения.

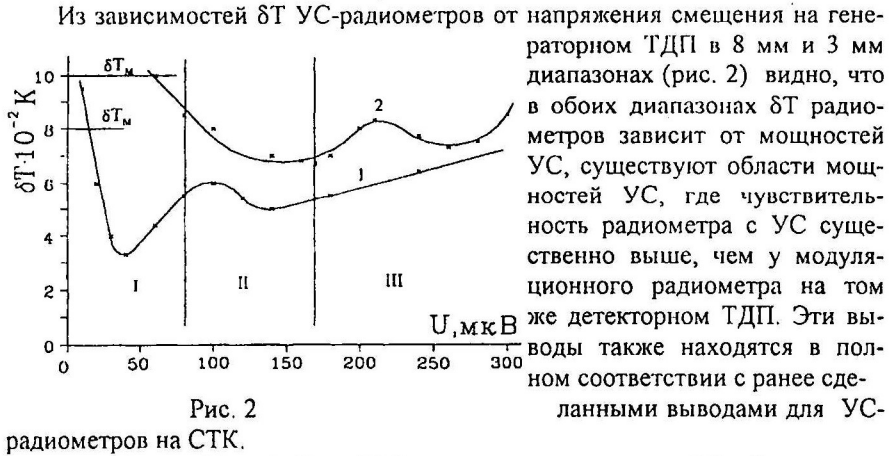
Отметим, что  $T_{ш}$  легко управлять, меняя напряжение на переходе аналоговым или цифровым образом. С практической точки зрения немаловажно, что мощность блока управления в этом случае существенно меньше, чем при любой другой системе подшумливания.

Величины шумов позволяют использовать ТДП и для калибровки радиометра. Причем для выполнения калибровки и подшумливания может быть использован один и тот же ТДП, на который в момент выполнения калибровки подается соответствующее напряжение смещения. Результаты измерений показали, что относительная стабильность температур выше относительной стабильности тока смещения примерно в три раза.

Были проведены исследования КРД и на круглом волноводе, рассчитаны мощности, поглощенные детекторным и генераторным ТДП при подаче излучения внешнего монохроматического генератора.

После этого исследованы ВАХ, отклики и рассчитаны вольтваттные чувствительности детекторного ТДП в зависимости от тока через генераторный ТДП. Обнаружено, что при подавлении критического тока  $I_c$  детекторного ТДП до значений  $(0,4 - 0,6) \cdot I_c$ , отклик и вольтваттные чувствительности

имеют максимальные значения. Оптимальное значение мощности УС с учетом потерь на рассогласование составило величину  $2,3 \cdot 10^{-10}$  Вт, что совпадает с оптимальными мощностями радиометров на СТК.



Для ДП  $I_c = 30$  мкА,  $R_n = 57$  Ом измеренное значение  $\delta T$  в 8 мм диапазоне волн составило  $\leq 0,01$  К. Такие высокие значения чувствительности достигнуты, несмотря на то, что использованные ТДП имели сопротивления, существенно меньшие необходимых для оптимального согласования с СВЧ-трактом.

Были исследованы процессы подшумливания с использованием генератора шума на ТДП. При этом увеличением тока через ТДП для всех исследованных температур фонового излучения удалось добиться превышения его сигнала над температурой фона. Так, для температуры шума  $\sim 100$  К, токи через генераторы УС и ГШ составили 90 и 130 мкА соответственно. Суммарная мощность, потребляемая их источниками питания, составила  $10^{-7}$  Вт. Столь малая величина мощности управления и подшумливания выгодно отличает эти устройства от аналогичных "теплых" приборов того же назначения.

В восьмой главе, основываясь на полученных выше результатах, разработанных принципах создания многоканального радиометра на джозефсоновских элементах, включающих в себя выбор и исследование оптимальной схемы построения и результатах изучения свойств различных джозефсоновских структур, была поставлена и решена задача создания макета восьмиканального широкополосного джозефсоновского УС-радиометра на ТДП 1,5 мм диапазона длин волн [A14, A15]. Приведены результаты моделирования и исследования характеристик этого радиометра. Наряду с изложением принципов создания матричного радиометра описываются конструктивные особенности блоков и систем устройства.

Выбор частотного диапазона с верхней границей 260 ГГц и нижней границей 180 ГГц объясняется наличием в этом диапазоне окна прозрачности атмосферы. Обоснован также выбор квазиоптического исполнения входного тракта, что позволяет снизить прямые потери входных сигналов и применить полученный опыт для создания радиометров субмиллиметрового диапазона волн.

Восьмиканальный криогенный макет располагался в транспортном сосуде Дьюара. Сигнал на 8 элементную микросхему подавался через лучевод, в котором закреплены фазовые корректоры, апланатические линзы и входной объектив. Фазовые корректоры необходимы для сглаживания амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) СВЧ-тракта. Апланатические линзы используются в лучевode в качестве входного объектива и согласующей линзы в детекторной секции. Измеренные общие потери лучевода составили - 0,8 дБ, что близко к результатам расчета. Для осуществления работы приемника в режиме с управляющим сигналом, генераторный ТДП и ТДП для подшумливания располагались в детекторной секции между матрицей и согласованной нагрузкой.

Приемник состоял из криогенного зонда (с СВЧ трактом и блоком предварительного усиления) и блока радиометрической обработки сигналов, включающего интерфейсную плату связи с ПЭВМ. Блок предварительного усиления включает в себя малoshумящие предварительные усилители низкой частоты с охлаждаемыми низкочастотными трансформаторами, источники тока смещения, генераторы компенсирующих импульсов. Все составляющие блока выполнены в восьмиканальном варианте.

Обработка сигналов, выделенных детектором многоэлементной приемной системы, состоит в их усилении, синхронном детектировании, сравнении с опорным сигналом ГШ и преобразовании в цифровой код для последующего построения изображения на экране монитора ЭВМ в реальном масштабе времени.

Для отработки конструкции деталей СВЧ тракта, измерения потерь в лучевode и настройки НЧ узлов при комнатной температуре была создана восьмизлементная линейная матрица на диодах с барьером Шоттки (ДБШ), изготовленных в едином технологическом цикле с антеннами-бабочками. С ее помощью была проведена проверка СВЧ-тракта, узлов съема продетектированных сигналов и восьми каналов усиления и синхронного детектирования. Проведено измерение потерь в лучевode по каналам приема, напpяжения шумов и мощностей, эквивалентных шуму каналов усиления.

Измерения диаграммы направленности модели линейной матрицы проводились на макете детекторной секции с использованием точечного источника монохроматического сигнала частотой 220 ГГц, размещенного в дальней зоне антенны. Результаты измерений позволили определить диаграмму направленности антенн одноканального приемника и многоканального радиометра в целом. Анализ полученных результатов свидетельствует о том,

что для успешной работы многоканального приемника разброс параметров нелинейных элементов в матрице (в частности, нормальных сопротивлений ТДП) не должен превышать 10 %. Результаты модельного эксперимента доказали работоспособность приемника в целом.

Проведено рассмотрение варианта возможной обработки радиометрических сигналов многоэлементного приемника при наличии помех. При этом, предполагается выделение движущихся объектов с помощью пространственно-временной фильтрации путем сравнения последовательно наблюдаемых кадров, т.е. изображений просматриваемого поля. Осуществляя выборку во времени значений радиоярких температур поля и вычитая значения сигналов, получаемых в каждом предыдущем кадре, из значений в текущем кадре, можно скомпенсировать сигналы, не изменяющиеся во времени, и, напротив, выделить сигналы, изменяющиеся от кадра к кадру.

Изучение процесса приема и построения формы протяженного источника сигнала и его температурного контраста производилось при помощи специально разработанного и изготовленного измерительного стенда.

В результате исследований приемника с джозефсоновскими переходами при температуре жидкого гелия измерена флуктуационная чувствительность, динамический диапазон, полоса приема по каждому каналу, переходное ослабление между каналами и диаграмма направленности антенной системы радиометра. Проведенные исследования радиофизических характеристик макетного образца восьмиэлементного радиометрического приемника на ТДП показали, что предложенные модель и принципы построения позволяют осуществить создание многоэлементного сверхпроводникового приемника с высокими радиофизическими характеристиками и удобным сервисным обслуживанием, обеспечивающим надежную работу устройства. Полученные результаты могут лечь в основу создания устройств со значительно большим числом каналов, в том числе и для создания систем радиовидения.

В главе 9 решаются две основные группы задач: исследование возможности применения радиометра на СТК для дистанционного исследования взволнованной водной поверхности в условиях полигона и определение связи параметров поверхностного волнения с вариациями радиояркой температуры водной поверхности.

Эксперименты [А16] проводились на установке, включающей бассейн, оборудованный волнопродуктором, позволяющим создавать волны с амплитудой  $0 \div 30$  мм и длиной  $80 \div 400$  мм, волногасителем, системой создания плоской затопленной струи и емкостными контактными регистраторами параметров волнения.

Измерения показали, что в течение всего срока проведения экспериментов (28 суток) параметры джозефсоновских контактов и  $\delta T$  радиометра практически не изменялись. Принятые меры позволили даже в условиях полигона работать с контактами,  $I_c$  которых не превышает 0,5 мкА,  $\delta T$  радио-

метра составляла  $\leq 0,01$  К. Это свидетельствует об эффективной защите от наводок.

Были изучены зависимости приращения радиоярких температур от амплитуд и длин гравитационно-капиллярных волн. Проведены эксперименты по определению возможности разрешения небольших мелкомасштабных возмущений поверхности воды. Исследовались вариации излучения поверхности воды при наличии на ней капиллярных волн, образованных на акватории бассейна под действием ветра. Исследовалось влияние течения на радиоизлучение. Показано, что благодаря высокой чувствительности джозефсоновского радиометра надежно регистрировались приращения радиояркой температуры при изменении амплитуды гравитационно-капиллярных волн на 4 - 5 мм и ряби на  $\sim 1$  мм [A17].

Для интерпритации полученных результатов выполнен численный расчет собственного радиотеплового излучения воды в рамках приближения геометрической оптики, когда характерные размеры неровностей на поверхности значительно превышают длину радиоволны [A18]. Результаты расчета совпадают с экспериментальными данными при больших длинах волн и малых амплитудах. При невыполнении последнего условия пологость волны, как следует из результатов экспериментов, нарушается, гребень ее становится острее, чем подошва, поэтому расчет, выполненный для строго гармонической волны, приводит к расхождениям с экспериментальными результатами.

Результаты исследования излучения факела горения модели реактивного двигателя обсуждаются в главе 10. Факел горения реактивного двигателя представляет собой низкотемпературную плазму. В отсутствие магнитного поля в ней преобладающим является тормозной механизм излучения, который характеризуется непрерывным спектром. Логично предположить, что для плазменных образований, имеющих геометрию, отличную от шарообразной, может наблюдаться анизотропия радиоизлучения, а также зависимость интенсивности характера спектра от состояния плазмы. В связи с тем, что данные эффекты являются достаточно слабыми, экспериментальные исследования должны выполняться с привлечением высокочувствительной приемной аппаратуры.

Целями исследований являлись [A19, A20]:

- определение возможности использования высокочувствительных радиометров на СТК Джозефсона для дистанционного зондирования факела горения макета твердотопливного двигателя;
- определение направленных свойств радиотеплового излучения факела горения;
- определение спектральных характеристик излучения факела горения;
- определение динамики развития излучения факела горения.

Экспериментальная установка и комплекс измерительной аппаратуры, использованных при проведении экспериментов [A21] включали модель ка-

меры сгорания твердотопливного двигателя; радиометрический комплекс, устройства для регистрации режимов работы двигателя; фото-видео аппаратуру; поглощающие экраны для устранения переотраженных волн.

Проведенные исследования можно разделить на две группы. В первой из них использовался широкополосный сверхвысокочувствительный детекторный радиометр на точечном контакте Джозефсона, с центральной частотой 20 ГГц [A22]. Во второй - эксперименты проведены с использованием комплекса радиометров, включающего супергетеродинный приемник со смесителем на входе частотой 37,5 ГГц, приемник прямого усиления частотой 22,5 ГГц, приемник прямого усиления частотой 3,5 ГГц. Технические характеристики всех использовавшихся радиометров приводятся в данном разделе.

В результате экспериментальных исследований получены направленные, спектральные и временные характеристики излучения факела горения модели твердотопливного реактивного двигателя [A23, A24]. При этом, именно применение высокочувствительного джозефсоновского радиометра позволило зарегистрировать временные характеристики излучения факела горения. Обращает на себя внимание обнаруженная неизотропность диаграммы направленности излучения факела на всех рассматриваемых частотах.

По результатам измерений характеристик радиотеплового излучения факела рассчитаны электрофизические параметры составляющей его плазмы. Расчет основан на априорном выборе интервалов изменений концентрации электронов  $N_e$  и частоты столкновения электронов с нейтральными частицами  $\nu$  для аналогичных плазменных образований. Вычисленные с приближением  $\sim 50\%$ , они оказались равными:  $N_e \approx 1,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $\nu \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ , рассчитанная интегральная температура  $T$ , средняя для трех частот, оказалась равной  $\sim 900 \text{ K}$ .

Предложена математическая модель излучения плазмы, в которой последняя представляет собой плоский слой с толщиной, равной видимому диаметру факела горения [A25]. Для равновесной, однородной, изотропной модели излучение прямо пропорционально электронной температуре, а коэффициентом пропорциональности является поглощательная способность. Распространение волн в средах, свойства которых постоянны на сферических или цилиндрических поверхностях, во многом сходно с их распространением в плоскостной среде. Поэтому, несмотря на то, что в экспериментах плазма имеет форму, близкую к цилиндрической, математическая модель была выбрана в виде плоского слоя, тем самым, задача была сведена к одномерному случаю. При этом, за основу были взяты известные модели направленного излучения неметаллических сред с учетом спектра излучения плазменной среды и закона Снеллиуса для проводящих сред. Указанные модели комбинировались с целью получения в явном виде данных о спектральных харак-

теристиках и направленности излучения. Были сформулированы условия адекватности математической модели.

С помощью описанной модели факела горения твердотопливного реактивного двигателя теоретически исследованы спектральные и направленные свойства его излучения. Расчетные кривые распределения интенсивности излучения качественно совпадают с кривыми, полученными экспериментально. Отличие состоит лишь в несколько большей изрезанности расчетных диаграмм излучения.

В Заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации:

1. Сформулированы требования к сверхпроводящим точечным контактам Джозефсона как детекторам СВЧ диапазона. Обоснован выбор дистанционно управляемого СТК в качестве нелинейного элемента многоканального радиометра. Изучено влияние на чувствительность детектора на СТК структуры и электрофизических параметров материала электродов. Показано, что наивысшей вольтваттной чувствительностью обладают СТК из монокристаллического ниобия. Исследована входная полоса радиометров на СТК Джозефсона. Показано, что входная полоса модуляционного радиометра на СТК в области сантиметровых и миллиметровых волн определяется полосой пропускания используемого в нем электронного модулятора.
2. Впервые создан четырехканальный радиометр 8-мм диапазона длин волн на основе СТК Джозефсона. В радиометре применена оригинальная конструкция дистанционно настраиваемых точечных контактов, что позволяет достаточно просто получать оптимальные значения сопротивлений контактов, обеспечив, вместе с тем, механическую стабильность, близкую к стабильности СТК, настраиваемых при комнатной температуре. Экспериментально определены значения нормальных сопротивлений контактов, при которых достигаются наилучшие шумовые и сигнальные характеристики радиометра. Для созданного макета оптимальное значение нормального сопротивления составляет  $\sim 150$  Ом. При этом флуктуационная чувствительность радиометра по каждому из каналов составляет  $\sim 0,01$  К при  $\tau = 1$  с и температуре фона  $\sim 300$  К.
3. Предложена доступная методика изготовления джозефсоновских переходов из мягких сверхпроводников методами интегральной технологии, ориентированная на использование серийного технологического оборудования. Показано, что у переходов, изготовленных по данной технологии, наблюдается квазичастичная проводимость.
4. Исследованы особенности детектирования СВЧ излучения торцевыми джозефсоновскими элементами. Теоретически и экспериментально изучены шумовые характеристики ТДП, как в автономном случае, так и при его включении в схему детекторного радиометра. Исследован гистерезис на ВАХ цепочек торцевых джозефсоновских переходов и связанное с ним



отрицательное сопротивление, которое объясняется наличием значительной емкости перехода.

5. Исследовано взаимовлияние двух ТДП, находящихся в единой электродинамической системе. Показано, что в зависимости от режима работы ТДП по постоянному току, их взаимодействие меняется в широких пределах и может быть достаточно интенсивным.
6. На основе изучения динамических свойств ВАХ джозефсоновских переходов предложен оригинальный способ регистрации электромагнитного излучения, использующий зависимость ВАХ контакта Джозефсона от мощности попадающего на него излучения. В радиометре, построенном по предлагаемой схеме, применяется модулированный управляющий сигнал СВЧ диапазона. Выигрыш в флуктуационной чувствительности достигается за счет подавления шумов собственной джозефсоновской генерации. Высказано предположение о том, что в качестве управляющего сигнала можно использовать как шумовое, так и монохроматическое излучение.
7. Эффективность работы УС радиометра существенным образом зависит от флуктуаций коэффициента передачи джозефсоновского детектора, в связи с чем, проанализированы возможные источники нестабильности этого параметра, выработаны требования к стабильности амплитуды компенсирующих сигналов. Значения флуктуаций коэффициента передачи детектора на СТК Джозефсона, полученные из расчетов и экспериментальных исследований, показали, что стабильность его коэффициента передачи достаточна для построения радиометра с управляющим сигналом.
8. Теоретический расчет, выполненный с использованием метода корреляционных функций, показал, что в схеме радиометра с УС имеет место уменьшение собственных шумов устройства, что в совокупности с выигрышем, связанным с отсутствием модулятора во входном тракте, приводит к улучшению в три раза флуктуационной чувствительности устройства по сравнению с модуляционным радиометром на том же самом переходе Джозефсона.
9. Созданы и экспериментально исследованы УС-радиометры 8мм диапазона волн на СТК Джозефсона с шумовым и монохроматическим УС. Показано, что существует оптимальная для получения наивысшей флуктуационной чувствительности мощность УС. Ее величина для использованных СТК составила  $10^{-10} \div 10^{-9}$  Вт. Наилучшее значение флуктуационной чувствительности при этом составило  $\sim 0,004$  К, при  $\tau = 1$  с, что втрое лучше, чем у модуляционного радиометра на том же СТК. Экспериментально показано, что флуктуационная чувствительность УС-радиометра линейно растет с уменьшением температуры фона, что хорошо согласуется с выводами теории и соответствующими данными для модуляционных джозефсоновских радиометров.



10. На основе количественного изучения собственной генерации торцевых джозефсоновских переходов показана возможность их использования в качестве генераторов УС, калибровочного сигнала и сигнала подшумливания в схеме широкополосного джозефсоновского УС-радиометра.
11. Разработан и изготовлен одноканальный криогенный радиометрический датчик, позволяющий производить изучение ТДП, включенных в электродинамическую систему и исследование различных вариантов построения джозефсоновских радиометров, в том числе многоканальных.
12. Экспериментальные исследования радиофизических характеристик КРД в режиме с УС показали высокую эффективность использования ТДП в качестве генератора УС в радиометре. Исследована модель одноканального УС-радиометра, показано, что выигрыш в флуктуационной чувствительности по сравнению с модуляционным радиометром составляет около двух раз, и определяется подавлением собственной генерации перехода. При мощности управляющего сигнала  $P_{yc} \approx 2,3 \cdot 10^{-10}$  Вт достигнуто значение флуктуационной чувствительности в 8-ми миллиметровом диапазоне длин волн  $\leq 0,1$  К, при  $\tau = 1$  с.
13. Создана и исследована восьмиэлементная микросхема - модель элемента многоканального приемника; проведен расчет и исследование характеристик согласующих антенн для эффективного взаимодействия ТДП микросхемы с СВЧ-сигналом.
14. Разработана система принципов, на основании которой можно создать многоэлементный джозефсоновский радиометр микроволнового диапазона. Среди них - использование схемы с управляющим сигналом, применение ТДП, как в качестве детекторов в каждом из каналов, так и в качестве генераторов УС, сигнала калибровки и сигнала подшумливания, использование планарных антенн и квазиоптического тракта. Данные принципы могут служить основой для создания систем радиовидения.
15. Проведены исследования радиофизических характеристик восьмиканального джозефсоновского радиометра, созданного на основе указанных выше принципов, получены следующие значения: диапазон принимаемых частот  $180 \div 260$  ГГц, среднее значение флуктуационной чувствительности  $\leq 1,7$  К, угловая ширина главного лепестка диаграммы направленности  $\approx 20^\circ$  в Н-плоскости и  $\approx 2,5^\circ$  в Е-плоскости, переходное ослабление между каналами - 25 дБ.
16. Проведены исследования ВАХ и отклика на электромагнитное излучение высокотемпературных джозефсоновских переходов на бикристаллической подложке из фиаanita, стабилизированного иттрием в частотных диапазонах  $128 \div 142$  ГГц и  $530 \div 560$  ГГц. Показано, что отклик содержит как джозефсоновский с.клик, преобладающий при малых напряжениях смещения ( $V \leq V_c$ ), так и отклик, связанный с квазичастичной прыжковой проводимостью (при  $V \gg V_c$ ). Воздействие СВЧ излучения

- приводит к увеличению этой проводимости за счет фотостимуляции прыжковой проводимости.
17. Исследованы характеристики цепочек ВТСП ДП на бикристаллической подложке, а также их взаимодействие с внешним СВЧ излучением. Результаты исследований показали, что цепочки обладают значительно большими нормальными сопротивлениями, чем одиночные ВТСП ДП, что увеличивает их вольтваттную чувствительность и динамический диапазон, тем самым облегчает их использование в радиометрах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов;
  18. С помощью джозефсоновского радиометра 8 мм диапазона волн на СТК исследовано радиотепловое излучение водной поверхности при наличии на ней гравитационно-капиллярных волн и ветровой ряби. Эксперименты показали, что джозефсоновский радиометр может успешно использоваться для проведения длительных геофизических исследований в условиях полигона.
  19. Предложена модель излучения гравитационно-капиллярных волн на поверхности воды, в которой вариации излучения связываются с изменением нелинейности профиля возмущений. На основании экспериментальных данных был выполнен численный расчет собственного излучения воды, поверхность которой моделируется монохроматической ГКВ. Результаты расчета совпадают с экспериментом при больших длинах волн и малых амплитудах.
  20. Впервые криогенный радиометр на СТК Джозефсона был использован для дистанционного изучения характеристик низкотемпературной плазмы. Это позволило зарегистрировать временные характеристики излучения факела горения на модели твердотопливного реактивного двигателя.
  21. Проведены экспериментальные исследования диаграмм направленности радиоизлучения факела на модели твердотопливного реактивного двигателя в диапазоне 3,5 – 37,5 ГГц, результаты которых показали анизотропность излучения на всех рассматриваемых частотах. Для анализа экспериментальных результатов предложена математическая модель излучения однородного, стационарного, квазиравновесного плоского плазменного слоя с толщиной, равной видимому диаметру факела горения. С помощью модели удалось теоретически исследовать спектральные и направленные свойства его излучения в СВЧ диапазоне. Анализ экспериментальных и теоретических результатов продемонстрировал их качественное согласие.

В процессе выполнения исследований был разработан ряд методик, созданы экспериментальные и измерительные установки. К ним относятся, в частности:

- методика определения диссипации мощности СВЧ сигнала в криогенном датчике с двумя ТДП;

- методика определения величины мощности СВЧ управляющего сигнала, попадающей на детекторный ТДП и определение оптимального режима работы управляющего ТДП;
- методики измерения флуктуационной чувствительности джозефсоновских детекторных приемников с управляющим сигналом на СТК и ТДП;
- методика измерения диаграммы направленности восьмиканального приемника;
- созданы экспериментальные установки для исследований радиофизических характеристик модуляционных криогенных радиометров, радиометров с управляющим сигналом на СТК и ТДП;
- создан измерительный комплекс для полуавтоматической регистрации электрофизических характеристик ВТСП ДП, позволяющий в едином цикле измерений определять основные радиофизические параметры и их изменения, происходящие в диапазоне температур 4,2 - 77 К;
- создана экспериментальная установка для исследования собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в условиях полигона;
- создана экспериментальная установка для исследования с помощью радиометров диапазона 3,5 – 37,5 ГГц радиоизлучения факела горения моделей реактивных двигателей с возможностью регистрации давления в камере сгорания.

Сформулированы основные принципы создания современных многоканальных приемных устройств на низкотемпературных джозефсоновских элементах.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

А1. Наумов А.А. Использование пассивной СВЧ-радиометрии для дистанционного контроля состояния окружающей среды и энергетических объектов // Материалы 4 Всероссийской научно-практической конференции с международным участием "Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности". Санкт-Петербург. 1999. Т. 2. С. 281-284.

А2. Ильин В.А., Каменецкая М.С., Фатыхов К.З., Наумов А.А. и др. Особенности приема СВЧ-излучения широкополосными джозефсоновскими устройствами // Сб. научных трудов. «Методы обработки радиосигналов» М.: Изд. МЭИ. 1988. С. 60-64.

А3. Наумов А.А. Джозефсоновский элемент на основе мягких сверхпроводников в интегральном исполнении // Электронное приборостроение. Казань. 1998. В. 8. С. 7-13.

А4. Меледин Д.В., Ильин В.А., Липатов А.П., Наумов А.А. Установка для измерения электрофизических параметров джозефсоновских переходов из высокотемпературных сверхпроводников // Учебный эксперимент в высшей школе. 1998. № 1. С. 27-35.

A5. Веревкин А.А., Ильин В.А., Липатов А.П., Меледин Д.В., Наумов А.А. Характеристики последовательных цепочек YBaCuO джозефсоновских переходов на бикристаллической подложке // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 24. С. 83-90.

A6. Meledin D.I., Lipatov A.P., Ilyin A.A., Serjantov V.A., Naumov A.A. Conductivity and Microwave Response of YBaCuO Josephson Junctions on YSZ Bicristal Substrate // "IEEE Trans. of Appl. Supercond." 1999. V. 9. № 2. P. 3929-3932.

A7. Гушин В.П., Ильин В.А., Радзиховский В.Н., Наумов А.А., Эткин В.С. Четырехканальный джозефсоновский радиометр восьмимиллиметрового диапазона // М. Препринт ИКИ АН СССР. ПР-716. 1982. 10 с.

A8. Ильин В.А., Наумов А.А., Эткин В.С. Радиометр: Авторское свидетельство № 1107660 от 8.04.1984. Гос. комитет СССР по делам изобретений и открытий.

A9. Ильин В.А., Наумов А.А., Эткин В.С. Флуктуационная чувствительность радиометра с управляемой вольт-амперной характеристикой // Радиотехника. М.: 1987. № 7. С. 18-20.

A10. Ильин В.А., Наумов А.А., Эткин В.С. Расчет чувствительности джозефсоновского радиометра с пилот-сигналом // Сб.: Радиоастрономическая аппаратура. Ереван: Изд. АН Арм.ССР. 1985. с. 153-154.

A11. Ильин В.А., Наумов А.А., Эткин В.С. Детекторный радиометр 8 мм диапазона с пилот-сигналом на сверхпроводящем точечном контакте Джозефсона // Сб.: Радиоастрономическая аппаратура, антенны и методы. Ереван: Изд. АН Арм.ССР. 1982. С. 86-87.

A12. Ильин В.А., Наумов А.А., Эткин В.С. Исследование детекторного радиометра с пилот-сигналом на сверхпроводящем точечном контакте Джозефсона // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 3. С. 184-187.

A13. Ильин В.А., Калантаров М.Л., Наумов А.А., Куделя А.М. Малошумящие детекторные радиометры СВЧ диапазона волн на торцевых джозефсоновских переходах // Тез. докладов II Международной конференции "Проблемы и прикладные вопросы физики". Саранск. 1999. С. 116.

A14. Ильин В.А., Куделя А.М., Наумов А.А. Многоканальный джозефсоновский радиометр для мониторинга природных и антропогенных объектов // Изв. ВУЗов. "Проблемы энергетики". 1999. № 11-12. С. 94-96.

A15. Ильин В.А., Куделя А.М., Кужель В.И., Лебединский А.М., Наумов А.А., Шум А.Н. Восьмиканальный сверхпроводниковый приемник субмиллиметровых волн // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45. № 2. С. 253-256.

A16. Габдракипова М.Н., Ильин В.А., Наумов А.А. и др. Исследование вариаций радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности с помощью многоканального джозефсоновского радиометра // М.: Препринт ИКИ АН СССР. ПР-811. 1983. 28 с.

A17. Ильин В.А., Иванов Г.Н., Наумов А.А. и др. Радиогидрографические исследования поверхностных гравитационно-капиллярных волн. // Сб. тез. XIУ Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. М.: Изд. Наука. 1984. С. 178.

A18. Ильин В.А., Наумов А.А., Райзер В.Ю., и др. Влияние коротких гравитационных волн на радиотепловое излучение водной поверхности // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1985. Т. 21. № 1. С. 83-89.

A19. Белавин В.А., Наумов А.А., Русева О.Г. Экспериментальное исследование диаграмм направленности факела горения // Тезисы доклада научн. конф. проф-преп. состава КФ МЭИ. Казань: Изд. КФ МЭИ. 1995. С. 45-47.

A20. Белавин В.А., Наумов А.А., Русева О.Г. и др. Экспериментальные исследования радиоизлучения факела горения реактивного двигателя // Прикладная физика. 1997. № 4. С. 67-70.

A21. Абдршин Р.Н., Белавин В.А., Ильин В.А., Наумов А.А. и др. Исследование радиотеплового излучения факела горения с помощью широкополосного джозефсоновского радиометра // Межвузовский сб. научных трудов «Радиоэлектронные устройства и системы». Казань. 1993. С. 125-129.

A22. Ильин В.А., Каменецкая М.Р., Наумов А.А. и др. Джозефсоновские радиометры для радиоастрономических и геофизических исследований // Сб.: Радиоастрономическая аппаратура. Ереван. Изд. АН Арм.ССР. 1985. С. 180-181.

A23. Белавин В.А., Наумов А.А., Русева О.Г. Спектральные и пространственные характеристики излучения плазмы СВЧ диапазона // Межвузовский сборник научных трудов «Радиоэлектронные устройства и системы». Казань. 1996. С. 140-146.

A24. Белавин В.А., Наумов А.А., Русева О.Г. и др. Радиометрия собственного радиоизлучения факела горения реактивного двигателя // Сб. тезисов XIX Всероссийской научной конф. "Распространение радиоволн". Казань. 1999. С. 226-227.

A25. Белавин В.А., Калантаров М.Л., Наумов А.А., Русева О.Г. Моделирование параметров собственного электромагнитного излучения факела горения реактивного двигателя // Сб. тезисов XIX Всероссийской научной конф. "Распространение радиоволн". Казань. 1999. С. 455-456.

#### Список цитируемой литературы:

1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука. 1974. 188 с.
2. Josephson B.D. Possible new effects in superconductor tunneling // Phys. Lett. 1962. V. 1. № 7. P. 251-253.
3. Лихарев К.К., Мигулин В.В. Приемники миллиметрового диапазона на эффекте Джозефсона (обзор) // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. № 6. С. 1121-1142.

4. Антюх Е.В., Дивин Ю.Я., Заболотный В.Ф., Надь Ф.Я. Широкополосный радиометр коротковолновой части миллиметрового диапазона на основе сверхпроводящего точечного контакта // *Астрономический журнал*. 1978. Т. 55. В. 4. С. 888-895.

5. Кисляков А.Г., Куликов В.А., Матвеев Л.В., Чернышов В.И. Высокочувствительный радиометр миллиметрового диапазона длин волн с джозефсоновским детектором // *Письма в астрономический журнал*. 1982. Т. 8. № 4. С. 253-256.

6. Ильин В.А. Широкополосные джозефсоновские радиометры для геофизических исследований // *Сб. тезисов Ленинских чтений МПГУ*. Ч. 2. М.: Прометей. 1991. С. 11.

7. Гудков А.Л., Лихарев К.К., Махов В.М. Высококачественные торцевые джозефсоновские переходы Nb-Si\*-Nb // *Письма в ЖТФ*. 1985. Т. 11. № 23. С. 1423-1426.

8. Гудков А.Л., Ильин В.А., Лаптев В.Н. и др. Сигнальные и шумовые характеристики последовательных цепочек торцевых джозефсоновских переходов // *ЖТФ*. 1988. Т. 58. № 11. С. 2261-2263.

9. Bednorz J.G., Muller K.A. Possible high Tc superconductivity in the Ba-Li-Cu-O system // *Phys. B. Condensed Matter*. 1987. V. 64. P. 189-192.

10. Гиппиус А.А., Павлова Л.С., Поляков В.М. Диагностика низкотемпературной плазмы в СВЧ и субмиллиметровом диапазонах. М.: Энергоиздат. 1981. 134 с.

11. Глазман Л.И., Матвеев К.А. Неупругое туннелирование через тонкие аморфные пленки // *ЖЭТФ*. 1988. Т. 94. С. 332-341.

ЛР № 020058 от 20.12.1995 г. Подписано в печать 2 марта 2000 г.  
Формат 60х84/16. Бумага офсетная. Усл.печ.л. 2,0. Уч.изд.л. 1,7  
Тираж 100 экз. Заказ № 435

---

Типография КГЭИ  
420066, Казань, Красносельская, 51



200